

金属材料红外隐身研究进展

黄朝义, 鲍艳*, 高璐, 于思珂, 张文博*

[陕西科技大学 轻工科学与工程学院 (柔性电子学院), 陕西 西安 710021]

摘要: 红外隐身对战场中军事目标的安全具有重大意义。金属材料具有较低的红外发射率, 是应用最为广泛的红外隐身材料之一。该文简述了金属材料作为红外隐身材料的机理; 综述了目前金属及其复合材料 (纤维膜、涂层、薄膜) 在红外隐身中的应用进展, 介绍了当前红外隐身涂层的主流理论与模型, 重点分析了金属材料的种类、形貌、粒径等对红外隐身涂层性能的影响, 总结了金属基红外隐身复合材料的结构设计 (多层结构、核-壳结构、多孔结构); 最后, 对金属材料实现多波段、智能化的隐身以及耐候性等未来的发展方向进行了展望。

关键词: 金属材料; 红外发射率; 红外隐身涂层; 表面改性; 核-壳结构

中图分类号: TG14 文献标识码: A 文章编号: 1003-5214 (2025) 11-2370-10

Research progress on metal materials for infrared stealth

HUANG Chaoyi, BAO Yan*, GAO Lu, YU Sike, ZHANG Wenbo*

[College of Bioresources Chemical and Materials Engineering (College of Flexible Electronics), Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, Shaanxi, China]

Abstract: Infrared stealth is of great significance in improving the survival rate of military targets on the battlefield. Metal materials are one of the most promising infrared stealth materials because of their low infrared emissivity. Herein, the mechanism of metal materials as infrared stealth materials was briefly described, while the applications progress on metal materials and their composite materials, including fiber membranes, coatings, and thin films for infrared stealth were summarized. The mainstream models of infrared stealth coatings were introduced, with the influence of metal material type, morphology and particle size on the performance of infrared stealth coating specifically analyzed. The structural designs of metal-based infrared stealth composite materials (multi-layer structure, core-shell structure, porous structure) were elaborated. Finally, future directions for the development of metal materials with multi band stealth, intelligent stealth, and weather resistance were discussed.

Key words: metal materials; infrared emissivity; infrared stealth coatings; surface modification; core-shell structure

隐身技术是指通过改变或弱化军事目标的可探测信息, 避免其被探测到的技术。根据不同的检测波段或技术手段, 隐身技术主要包括可见光隐身、雷达隐身、红外隐身等^[1]。红外隐身是将军事目标与其所处背景的红外辐射特征协调至尽可能一致, 以躲避红外探测头的检测, 从而实现隐身。目前, 红外隐身技术主要是改变环境红外辐射或弱化目标红外辐射特征, 由于前者存在隐身时间短、应用范围受限等缺

点, 因此, 主要通过后者来实现红外隐身^[2]。

自红外隐身技术被提出以来, 人们对其原理的了解愈加深入, 可选用的红外隐身材料主要包括半导体材料、高分子聚合物材料、金属材料等。其中, 半导体材料主要是由金属氧化物和掺杂剂构成的, 在实现红外隐身的同时能够兼容实现其他检测波段 (雷达、激光) 的隐身, 从而具备兼容隐身能力; 高分子聚合物材料主要是指导电聚合物, 其含有共

收稿日期: 2024-10-30; 定用日期: 2024-12-05; DOI: 10.13550/j.jxhg.20240822

基金项目: 国家自然科学基金项目 (22078188); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目 (2024JC-YBMS-122)

作者简介: 黄朝义 (2001—), 男, 硕士生, E-mail: hcy8733@foxmail.com。联系人: 鲍艳 (1981—), 女, 教授, E-mail: baoyan@sust.edu.cn; 张文博 (1988—), 男, 副教授, E-mail: zhangwenbo@sust.edu.cn。

轭 π 键, 从而具有类似于金属或半导体材料的电学和光学性质; 金属材料具有来源广泛、红外隐身性能优异、易于加工处理等优点, 是目前使用最广泛的红外隐身材料之一。

本文将简单地介绍金属材料适用于红外隐身的机理, 并根据不同应用场景和材料体系, 对金属材料在红外隐身纤维膜、红外隐身涂层及红外隐身薄膜中的应用进行详细介绍, 总结不同的结构设计对提升金属基红外隐身复合材料隐身性能的影响, 并对金属材料在红外隐身中的应用进行展望。

1 金属材料的红外隐身机理

红外线是指波长 (0.76~1000 μm) 介于可见光与微波之间的电磁波。根据热力学定律可知, 任何温度 $>0 \text{ K}$ 的物质都能向外发出红外线, 由于物质的热量吸收及发散主要通过红外辐射传递, 因此物质向外散发的大部分波段的红外辐射在传播过程很容易被外界吸收。其中, 只有 3 个小波段 (0.76~1.5、3~5 和 8~14 μm) 的红外线无法被空气吸收, 从而可以远距离传播, 这就是通常所称的“大气窗口”。红外探测系统是根据目标与环境在“大气窗口”的辐射强度不同, 从而识别并发现目标^[3]。因此, 为

避免目标被红外探测系统识别, 需要协调被保护的目标与其所处的背景在“大气窗口”的红外辐射强度趋于一致。物体的红外辐射强度符合 Stefan-Boltzmann 定律^[4]: $W = \varepsilon \sigma T^4$ (W 为物体的红外辐射能, J ; σ 为玻尔兹曼常数, J/K ; ε 为物体的红外发射率; T 为绝对温度, K), 由此可知, 控制目标红外发射率和温度是降低目标的红外辐射, 从而实现红外隐身的基本途径。红外线辐射到物体上时会产生吸收、反射和透射, 根据基尔霍夫热辐射定律可知, 物体与外界达到热平衡时, 其红外发射率 (ε) 与红外吸收率 (α) 相等, 因此对于红外透射率 (ρ) 为 0 的材料 (红外不透明材料) 而言, 其 ε 和红外反射率 (r) 有着以下关系: $\varepsilon = 1 - r$, 表明物体要具备低发射率特性, 需要具备高红外反射率^[5]。根据 Hagen-Rubens 定律, r 可表示为: $r = 1 - 2(2\delta_0\omega/\varphi)^{1/2}$ (ω 为角频率, rad/s ; δ_0 为介电常数, F/m ; φ 为物体的电导率, S), 综上表明, 电导率提高有利于降低红外发射率。金属材料大多属于红外不透明材料, 且具有着较高的载流子密度, 导电性能良好。因此, 大部分金属材料在“大气窗口”属于低红外发射率材料^[6], 常见材料的发射率及特性如表 1 所示。

表 1 常见材料的红外发射率
Table 1 Emissivity of several common materials

材料类型	常见材料	材料特性	发射率	参考文献
金属材料	Ag、Al、Cu 等	导电性高、发射率低、兼容隐身性能差、易氧化	0.1~0.5	[7]
半导体材料	ZnO、In ₂ O ₃ 、ZnS 等	发射率较高、性能稳定、可兼容隐身	0.5~0.9	[8-10]
高分子聚合物	PANI、Ppy 等	导电聚合物、可通过调节电流调节红外发射率、发射率较高、制备困难	0.6~0.9	[11-12]

注: PANI、Ppy 分别为聚苯胺和聚吡咯。

2 金属及复合材料在红外隐身中的应用

金属材料主要通过沉积成膜或和其他材料复合实现红外隐身, 根据目标形状大小和环境等不同的隐身需求, 目前, 常用的材料体系主要包括红外隐身纤维膜、红外隐身涂层和红外隐身薄膜等。

2.1 红外隐身纤维膜

纤维膜具有成本低廉、质量轻便、成膜柔韧等特点, 能够很好地满足军用帐篷、迷彩服等方面的应用需求, 但其发射率一般较高, 将其和金属材料复合是赋予纤维膜红外隐身性能的重要措施之一^[13]。FANG 等^[14]将金纳米颗粒和碳纳米管 (SWNT) 添加到纺丝液中, 通过静电纺丝技术制备了聚偏氟乙烯 (PVDF) 纤维膜 (Au-SWNT/PVDF), 金纳米颗粒的加入可以显著降低红外发射率 (图 1a)。由于金纳米颗粒能够均匀地分布在纤维内部, 从而增加

其导电性 (图 1b、c)。但仅仅将金属颗粒和纺丝液共混纺丝成膜后, 纤维中的金属颗粒分布较为分散, 对纤维导电性能提升不足。ZHAO 等^[15]在湿法纺丝的基础上, 结合热压工艺制得了热塑型聚氨酯 (TPU)/Ag 纤维膜, 随着热压过程的进行, Ag 粉会随着纤维膜分子的运动堆积得更加紧密, 与纤维膜结合得更牢固, 此外, 热压后纤维膜更加平整, 更有利于对红外形成反射 (图 2)。

虽然在纺丝液中直接引入金属粒子成膜工艺简单, 但纺丝液中引入过多金属粒子会破坏纤维结构, 影响成膜性能。此外, 金属粒子大多被包裹在纤维内部, 金属的红外反射能力无法完全发挥。ZHANG 等^[16]通过化学镀法在 TPU 纤维上镀银, 其红外发射率在波段 3~5 和 8~14 μm 分别为 0.294 和 0.292。WANG 等^[17]首先通过静电纺丝法制备了聚丙烯腈 (PAN) 掺片状纳米 (NS) 铝氧化锌 (ZAO) 复合

纳米纤维膜 (ZAO/PAN), 进而采用化学镀法制成了银纳米粒子 (NP) 的聚丙烯腈复合纳米纤维膜 (Ag/ZAO/PAN)。随着化学镀的进行, 纤维表面逐渐被银覆盖, 红外反射率上升, 在红外热成像照片下呈现良好的红外隐身能力 (图 3)。

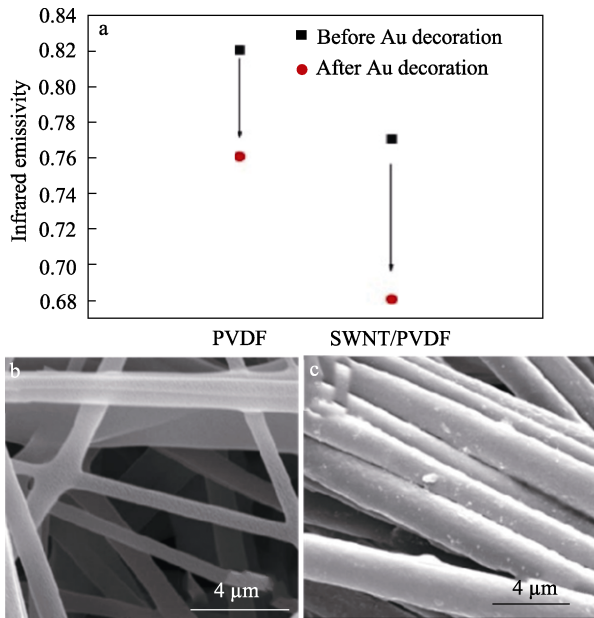


图 1 PVDF、Au-PVDF、SWNT/PVDF 和 Au-SWNT/PVDF 纤维膜的红外发射率 (a); PVDF (b) 和 Au-SWNT/PVDF (c) 的 SEM 图^[14]

Fig. 1 Infrared emissivity of PVDF, Au-PVDF, SWNT/PVDF and Au-SWNT/PVDF fiber membrane (a); SEM images of PVDF (b) and Au-SWNT/PVDF (c)^[14]

然而, 静电纺丝技术存在原料受限、需要使用有机溶剂等问题, 这限制了其进一步的使用^[18]。因

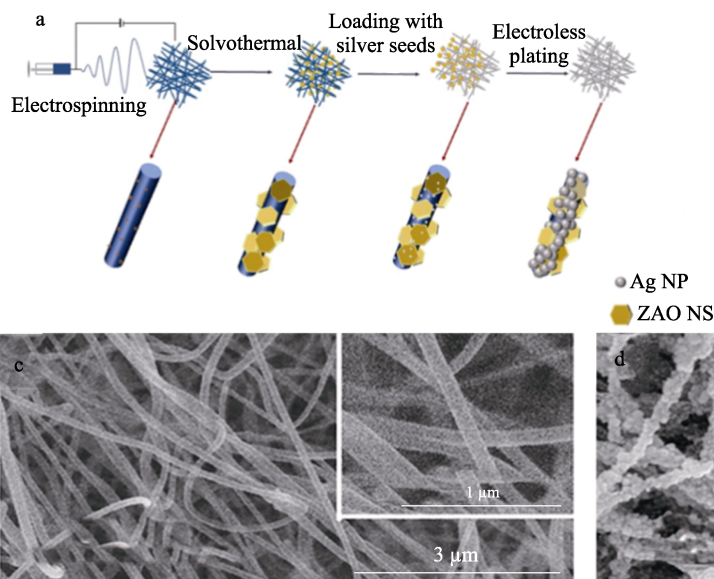


图 3 Ag/ZAO/PAN 的制备工艺流程示意图 (a); PAN 纤维膜 (左) 和 Ag/ZAO/PAN (右) 覆盖在手上后红外热成像图 (b); PAN 纤维膜 (c) 和 Ag/ZAO/PAN (插图为放大图) (d) 的 SEM 图^[17]

Fig. 3 Schematic diagram of preparation process of Ag/ZAO/PAN (a); Infrared thermal imaging images of PAN fiber membrane (left) and Ag/ZAO/PAN (right) covered on the hand (b); SEM images of PAN fiber membrane (c) and Ag/ZAO/PAN (The insert is an enlarge image) (d)^[17]

此, YE 等^[19]以天然纤维为材料, 通过化学沉积和热压工艺制备了一种掺锡氧化锡 (ATO)-银-竹纤维膜 (ATO-Ag-BFs), 竹纤维上肖特基势垒的产生使其在 8~14 μm 波段的红外发射率降至 0.68。虽然竹纤维绿色环保, 可替代纺丝膜, 但其纤维尺寸较大、表面结构粗糙, 限制了红外发射率的进一步降低。此外, 化学沉积过程不易控制, 易造成厚度不均、表面粗糙的问题。WANG 等^[20]通过在聚酯织物上物理沉积纳米级银膜, 将红外发射率降至 <0.1 。

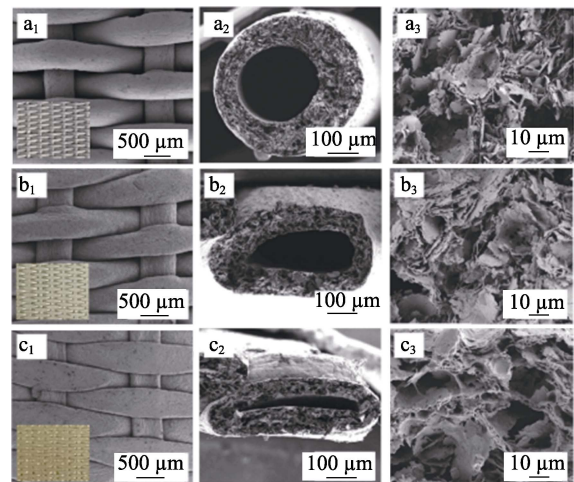
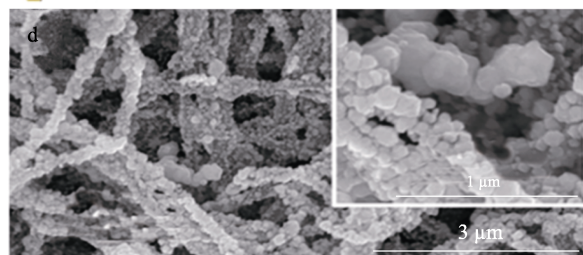
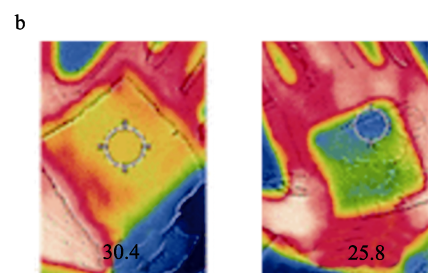


图 2 TPU/Ag 纤维热压前表面 (a₁) 和截面 (a₂、a₃) 的 SEM 图; TPU/Ag 纤维经不同压力热压后表面 (b₁、c₁) 和截面 (b₂、b₃、c₂、c₃) 的 SEM 图^[15]

Fig. 2 SEM images of surface (a₁) and cross-section of TPU/Ag fibers (a₂、a₃) before hot pressing; SEM images of surface (b₁、c₁) and cross-section of TPU/Ag fibers (b₂、b₃、c₂、c₃) after hot pressing at different pressure^[15]



通过简单工艺(共混、浸渍、化学镀等),将金属材料嵌于纤维膜内部或表面进行复合,可在军事应用方面起到基本的防护作用,作为军装或者伪装网,具有穿戴舒适、便于携带、易工业化生产等优点,但其发射率有待进一步降低,对能够适用于多波段隐身的纤维也需要深入开发。

2.2 红外隐身涂层

红外隐身涂层具有适用范围广泛、施工便捷等优点,将其涂覆在任何形状的目标表面,都能有效地降低目标的红外辐射强度。红外隐身涂层主要是由树脂黏合剂和低发射率的填料组成。黏合剂在红外隐身涂层中作为成膜物质,对涂层的机械性能起到关键作用,也对其红外隐身性能存在影响。金属作为红外波段的低发射率材料,是红外隐身涂层中使用最多的填料之一。金属的加入可以有效降低涂层表面树脂的分布,也能抑制树脂黏合剂中分子的振动及高吸收基团在红外波段的吸收强度。金属材料的参数影响着涂层表面状态及内部结构,与红外隐身涂层的隐身性能密切相关。

2.2.1 理论模型

填料影响红外隐身涂层的因素众多,为推进红外隐身涂层的进一步发展,确定红外隐身涂层性能的最佳工艺,可通过简化红外隐身涂层的几何结构、建立各种等效模型,来研究红外辐射在涂层内部及表面的辐射机理。

2.2.1.1 有效介质理论

有效介质理论是利用电磁学原理,分析电磁波与金属粒子的相互作用,忽略红外在涂层中的散射,采用单组分介质的计算方法,计算复合涂层的有效介电常数,得到红外隐身涂层的辐射特性^[21]。该理论主要用于描述球形或椭球状金属粒子的间距明显大于红外光波长的辐射行为,在均匀介质的光学散射计算中表现优异^[22]。但当涂层中粒子尺寸过大或者形貌不规范时,散射的作用不可忽视;同时,对金属填料含量较高的涂层,该理论误差也较大,对非均匀红外隐身涂层发射率的模拟计算也与实际相差甚远^[23]。

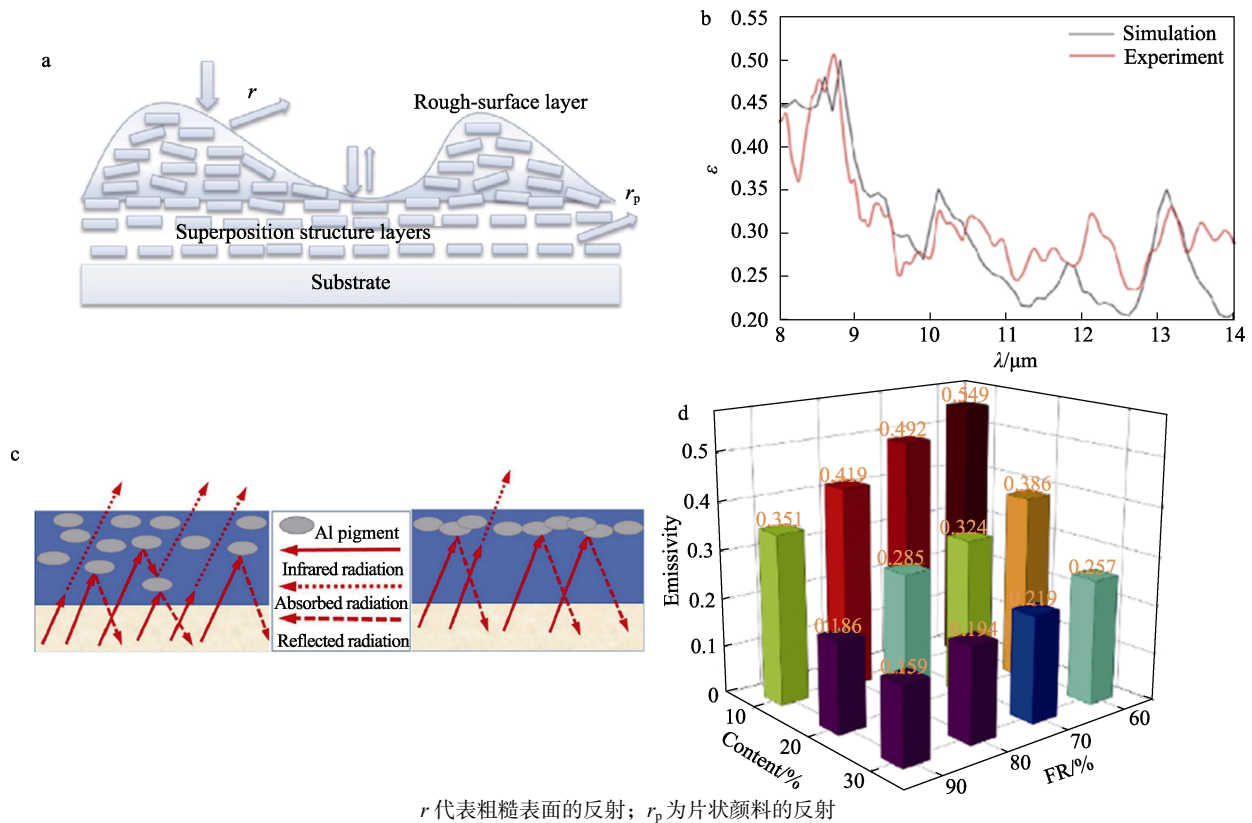
2.2.1.2 几何光学理论

几何光学理论是把涂层看作连续介质,最常见的模型是 Kubelka-Munk (K-M) 模型,该模型是将红外隐身涂层看作层层叠加的薄层,涂层的厚度远小于其面积,并将金属粒子散射视作相互独立,通过模拟光的吸收和散射过程来预测红外隐身涂层的辐射过程。LIU 等^[24]通过 K-M 模型模拟并计算了含铝粉颗粒涂层在 3~5 和 8~14 μm 波段的发射率,并通过单个粒子的吸收截面进行累积求和,计算了

涂层系统的有效吸收系数。结果表明,向前散射截面与吸收截面之比越小,发射度的下降越大。由于红外隐身涂层的红外光学性能不仅受其内部结构的影响,还与表面状态密切相关,但 K-M 模型将表面视为光滑结构,因此大部分情况下涂层表面无法满足理想条件。为解决这些局限性,JIANG 等^[25]在 K-M 模型基础上提出了改进的 Kubelka 层模型,该模型是由粗糙表面模型和 K-M 层模型 2 个子模型组成(图 4a),修改后的模型模拟涂层的发射率与实验结果吻合度较高(图 4b)。YANG 等^[26]引入了可以表征涂层表面粗糙结构的双向反射率分布函数,修改了 K-M 模型,修改后的模型与实际情况也比较接近。

2.2.2 金属填料的影响

金属填料的种类、含量、形貌、尺寸等对红外隐身涂层隐身性能及力学性能具有显著影响。红外隐身涂层中金属填料的添加量需要考虑到实际应用,工艺不同,金属的添加量也不同。一般来说,为把涂层发射率降至最低,刮涂成膜所需的填料相对喷涂更多,成膜也会相对更光滑。理论上,金属在涂层内的含量越高,涂层发射率越低。但在实际应用中,一方面,树脂的承载量有限,当填料超过树脂的临界体积浓度,树脂的力学性能将会大打折扣,无法实际应用;另一方面,涂层中金属填料占比过大会导致表面粗糙度增加,引起涂层隐身性能下降。吕丹丹等^[27]以环氧树脂、片状黄铜粉、改性剂为原料进行共混,通过刮涂法制备了一种力学性能良好的红外隐身涂层。当片状黄铜粉的质量分数从 20% 升至 50% 时,涂层表面的金属分布增加,红外发射率从 0.878 降为 0.585。YAN 等^[28]考察了铝粉质量分数对涂层力学性能的影响,结果表明,当铝粉质量分数为 25.0% 时,涂层的牢度、附着力、耐摩擦等机械性能与隐身性能相对平衡。综合实际应用及性能考虑,一般金属填料最佳质量分数为 30%~40%。实际上,由于红外线穿透能力不强,如果能将金属填料集中在涂层表面,那么可以用相对较低质量分数的金属填料实现涂层发射率最低的目标。SHI 等^[29]使用不同漂浮率(FR)的 Al 粉制备了 Al/PU(聚氨酯)红外隐身涂层,以降低吸波器表面的红外发射率(图 4c)。结果发现,随着 Al 粉漂浮率和含量(质量分数,下同)的增加,涂层发射率不断降低后趋于不变。但当铝粉漂浮率为 90%、含量为 20% 时,涂层的发射率可降至 <0.2,表明 Al 粉的漂浮率对涂层发射率的影响要远大于 Al 粉含量的影响(图 4d)。因此,合理选择漂浮率高的金属填料,可有效地降低红外发射率,同时避免涂层质量过多,影响其实用性能。



r 代表粗糙表面的反射; r_p 为片状颜料的反射

图 4 低发射率涂层模型示意图 (a); 涂层红外发射率模拟曲线与实测曲线对比图 (b)^[25]; 不同 Al 粉漂浮率下涂层红外发射率变化的机理示意图 (c): Al 粉的 FR 较低 (左)、高 (右); 铝粉含量和漂浮率对涂层红外发射率的影响 (d)^[29]

Fig. 4 Schematic diagram of low-emissivity coating (a); Contrast diagram of simulated and measured curves of infrared emissivity of coating (b)^[25]; Schematic illustration of mechanism for infrared emissivity variation in the coating with different Al floating rates: Low floating rate of Al powder (left), high floating rate of Al powder (right) (c); Effect of content and floating rate of Al powder on infrared emissivity of coating (d)^[29]

理论及实验均表明, 同种金属填料不同形貌制备的涂层发射率高低顺序为: 球状>柱状>片状。因为金属形貌为片状时, 其在涂层中更易于水平连续分布, 形成致密的金属层, 从而高效反射红外辐射^[30]; 另一方面, 相比于其他形貌而言, 具有边缘散射效应的片状填料对红外的散射作用更强, 从而能够有效提高涂层的红外反射率^[31]。SONG 等^[32]采用不同形貌的铝粉颗粒作为填料制备红外隐身涂层。结果表明, 当铝粉颗粒形貌为片状时, 涂层的发射率最低。同时, 当铝粉占涂层总体积分数为 30%时, 涂层的红外发射率比以球形颗粒为填料制备的涂层低 79% (图 5a~c)。片状和棒状的金属填料的厚径比越小, 其表面的边缘散射效应越明显, 发射率也越低。SONG 等^[33]结合几何光学理论, 建立了随机分布的片状颗粒系统模型, 结果发现, 随着片状颗粒厚度的增加, 红外发射率逐渐增大。当颗粒厚度从 1 μm 增至 10 μm 时, 涂层的红外发射率增加 100.3%。由于红外线具有一定的穿透能力, 因此, 为避免红外辐射透过颗粒被树脂吸收, 颗粒应具有一定的厚度, 从而增加对红外的屏蔽能力。WANG 等^[34]研究发现,

粒径过小, 片状铝粉的定向排列程度越差, 边缘散射会受限, 从而增大涂层的发射率; 而厚度过薄, 红外辐射易透过表面金属层被树脂吸收, 涂层的红外发射率会升高。LIU 等^[35]使用不同目数的片状铝粉制备涂层, 考察了金属填料粒径对涂层红外发射率的影响。结果表明, 随着铝粉粒径的减小, 红外发射率变化呈现“N”型变化 (图 5d)。这是因为, 红外隐身涂层的红外发射率与散射系数成反比, 而涂层的散射系数随着铝粉粒径的变化规律因粒径范围不同而有所差异。当铝粉粒径较大时, 涂层散射系数与粒径成正比; 当粒径缩小到米氏散射范围内时, 散射系数与粒径成反比; 当粒径进一步缩小到瑞利散射范围, 散射系数与粒径又成正比。结果表明, 红外发射率最小的片状颗粒为 325 目 (约 44 μm)。

2.2.3 金属填料的改性

金属作为红外隐身涂层填料, 具有优异的低发射性能, 但是仍存在一些不足: 金属在黏合剂中作为填料不易分散, 影响涂层的发射率; 由于红外隐身涂层多用于室外环境, 长时间暴露于阳光、空气、雨水中, 金属易被氧化, 造成涂层隐身性能下降明

显, 对环境的耐受能力(耐候性)较低, 使用寿命较短。此外, 金属表面颜色单一, 光泽度过高, 对

雷达的反射也较高, 不利于涂层实现红外兼容隐身, 因此, 需对其改性, 拓宽涂层的适用场景。

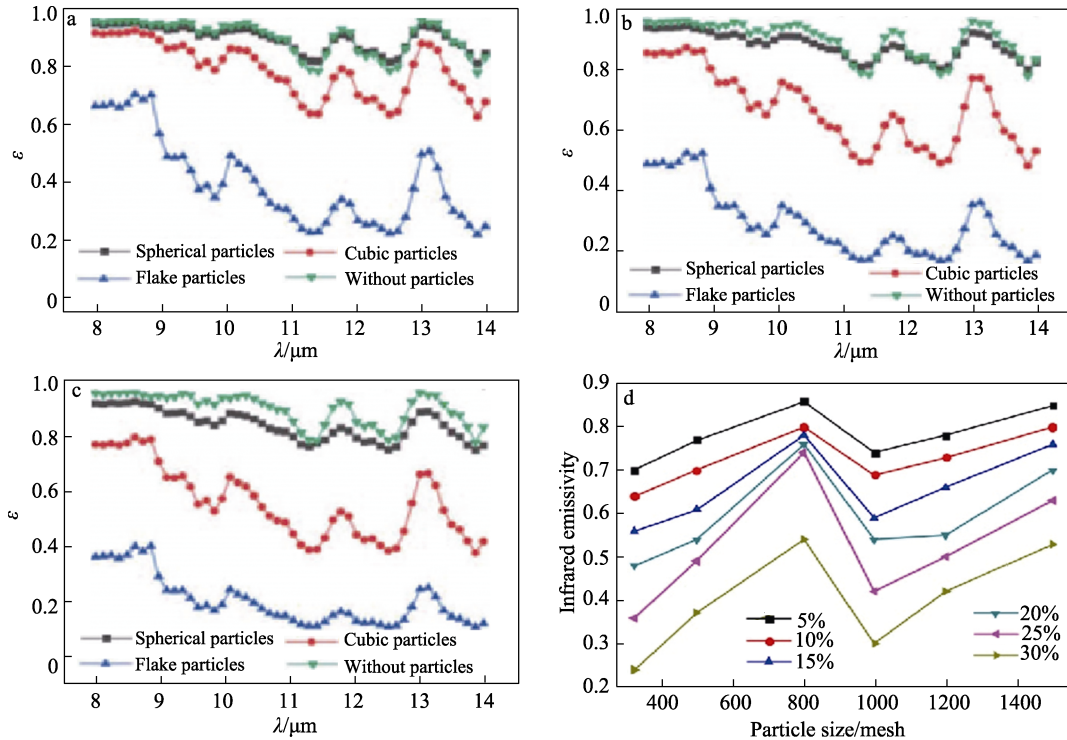


图 5 体积分数 10% (a)、20% (b) 和 30% (c) 的不同形貌 Al 粉对涂层红外发射率的影响^[32]; 不同目数及不同质量分数铝粉制备的涂层的红外发射率曲线 (d)^[35]

Fig. 5 Effect of Al powder with different morphologies with volume fraction of 10% (a), 20% (b) and 30% (c) on infrared emissivity of coatings^[32]; Infrared emissivity curves of coatings prepared by aluminum powder with different mesh sizes and different mass fractions (d)^[35]

SHI 等^[36]采用球磨法改性铝粉, 球磨后得到了不同漂浮率的片状铝颗粒, 经其制备的涂层发射率最低可达 0.204。因为铝粉经过球磨改性后, 铝粉表面状态及形貌发生变化, 漂浮率上升, 更易于在涂层表面形成致密的红外反射层, 为降低涂层发射率提供了一个简单的方法。为应对恶劣的应用环境, MA 等^[37]将不同的金属原料(铝、镍、钇和钴质量分数分别为 85%、5%、8%和 2%)完全熔化并制备成合金粉末, 与树脂及 Al 粉共混后制备了涂层。由于在涂层中 Al 粉围绕合金粉末形成了环状结构, 影响了 Al 粉的分布, 因此, 得到了具有良好机械性能的低发射率(0.568)红外隐身涂层。ZHANG 等^[38]为保证涂层红外性能长时间室外工作的耐候性, 采用硅烷偶联剂 KH560 对片状铝粉表面进行了化学接枝改性, 通过改善 Al 与树脂之间的界面相互作用以提高涂层的耐腐蚀性。结果表明, 涂层经盐水腐蚀 21 d 后, 仍具有较低的红外发射率(0.424)和良好的力学性能。为解决金属基红外隐身涂层无法兼容可见光隐身的问题, LIANG 等^[39]以聚氨酯(PU)为黏合剂, 将铝粉和纳米颜料共混后作为功能填料, 制备了可用于红外隐身的彩色涂层。CHAI 等^[40]采

用 Al 粉和 Cr_2O_3 共混作为填料, 制备了具有多波段隐身性能的涂层。当 Al 粉和 Cr_2O_3 的质量比为 2 : 1 时, 制得的涂层的发射率为 0.525, 外观颜色由灰色变为草绿色。调控 Al 粉与 Cr_2O_3 的质量比, 可实现涂层的红外、可见兼雷达隐身。QIN 等^[41]通过化学沉淀法, 成功地将氧化锡锑(ATO)包覆在片状 Al 粉上, 获得了一种红外兼容激光隐身材料。当 Sn 和 Sb 的质量比为 10 : 1 时, 改性后的片状 Al 粉具有最佳的红外兼容激光隐身性能, 红外发射率为 0.708、光谱反射率为 43.4%。

以金属为填料的红外隐身涂层目前能够适应大部分实际应用场景, 具有良好的力学性能, 操作简单、维护成本低。但树脂分子中高红外吸收基团的存在使涂层的发射率会受到限制而无法进一步降低。另外, 如何在提高发射率的同时实现兼容隐身和提高耐候性, 也是亟需解决的问题。

2.3 红外隐身薄膜

红外隐身薄膜是指通过物理沉积或化学沉积制备的具有超低发射率和特殊光学特性的薄膜, 通过对材料的选择和结构的设计, 有望实现更为先进的红外隐身^[42]。ZHANG 等^[43]通过磁控溅射技术, 制

备了 Ag-ZrB₂ 复合薄膜, 通过引入 Ag 相提高了 ZrB₂ 的载流子浓度, 有效降低了中红外波段的发射率。目前, 军用红外探测系统主要通过“大气窗口”识别并发现目标, 但是热量通过整个红外波段向外辐射, 常规红外隐身技术不具备散热窗口(5~8 μm), 势必会产生热积聚而导致目标表面升温, 从而造成隐身失效^[44]。TAEHWAN 等^[45]通过控制薄膜中 Au 和 ZnS 的尺寸, 满足了对不同波段的辐射需求, 制备的薄膜在“大气窗口”平均发射率<0.2, 在非“大气窗口”发射率>0.9, 并具备出色的辐射冷却能力和红外隐身能力, 在红外探测下表现出优异的红外隐身性能。为解决金属薄膜在可见光波段无法隐身

兼容的问题, CHEN 等^[46]采用磁控共溅射法制备了 Al-SiO₂ 纳米复合薄膜, 通过调节 Al 和 SiO₂ 的质量比, 将纳米颗粒复合膜的红外发射率降至 0.12, 同时其可见光吸收率提高至 0.67, 为二者兼容隐身提供了有效方法。

对金属薄膜进行设计, 可使其兼具优异的隐身和热学性能, 在红外隐身中具有很大的应用前景, 尤其是对光学特性具有特殊要求的场景。但金属薄膜对材料结构设计的要求较高、制造工艺复杂、成本高, 且维护较为困难。根据不同工作环境和具体要求, 将金属和不同材料复合或者直接沉积成膜具有不同的隐身效果, 具体如表 2 所示。

表 2 不同红外隐身材料的参数
Table 2 Parameters of different infrared stealth materials

材料体系	制备技术	适用范围	材料特性	红外发射率	参考文献
红外隐身纤维	共混、化学镀	织物、帐篷等	使用方便、隐身性能一般	0.4-0.7	[17, 19]
红外隐身涂层	刮涂、喷涂	伪装网、建筑、装备等	工艺简单、不受目标表面形状限制; 发射率较低、耐候性较差	0.1-0.6	[27-28]
金属薄膜	磁控溅射	飞机蒙皮	隐身性能优异、成本高、应用范围小	0.1-0.2	[46]

3 金属基红外隐身材料的结构设计

根据 Stefan-Boltzmann 定律, 降低目标的红外辐射, 可通过降低目标表面的发射率, 或者采取有效措施控制目标表面的温度来实现。金属材料不但低发射性能良好, 而且导热性能也十分优异, 但这并不利于长时间红外隐身。因此, 控制金属表面温度对实现金属红外隐身十分必要。此外, 在实际工作环境中, 由于金属对全波段反射率都较高, 也不利于雷达隐身。因此, 在不影响金属材料红外隐身性能的情况下实现多波段隐身, 对其实际应用也至关重要。可对金属材料进行结构设计, 将低发射率和控温相结合, 综合提高材料的红外隐身性能。目前, 常见的金属材料结构主要有多层结构、核壳结构、多孔结构。

3.1 多层结构

多层结构通常是由不同的功能层叠加构成, 在互不损害各自功能的前提下实现“1+1>2”的效果, 工艺相对简单可控。SU 等^[47]分别制备了铜粉和相变微胶囊 (MPCMs) 单层涂层, 然后以前者为表层, 后者为底层制备了双层复合涂层。温升数据表明, 铜粉和相变微胶囊的温度调节能力接近, 但是后者红外发射率明显低于前者 (图 6a)。由于红外发射率主要取决于表面, 所以当二者共混时, 胶囊会影响涂层的表面形貌。对高温或者处在阳光下的目标来说,

单一的低发射率层无法控制表面温度的急剧上升, 而单一的隔热层也会因为时间的推移产生热积聚, 从而导致隐身性能下降。LIU 等^[48]分别以 Ag/凯夫拉 (Kevlar) 纳米纤维气凝胶 (KNA)、KNA/石蜡 (PW) 和 PKNA/Ag 为顶层、中层和底层, 制造了一个多层斗篷, 其顶层用于反射红外辐射, 中间层具备温度调节能力, 底层防止目标红外向外辐射, 由此实现了高效、持久的红外隐身能力 (图 6b、c)。LIU 等^[49]在 PE 非织造布上先后沉积 Au 薄膜和钛合金表面物理气相沉积 (TiAlN) 膜, 该纺织品表面发射率可以根据温度自发变化, 其发射率前后最大相差 0.53, 高于目前大部分的红外调节方法, 制备工艺也相对简单。除了根据选材构建多层结构实现多重功能外, 还可以对各层厚度进行调控以优化性能。DANG 等^[50]设计了一种电介质/金属/电介质结构的 ZnS/Ag/ZnS 薄膜, 采用粒子群优化了各层的厚度后, ZnS/Ag/ZnS 薄膜的平均可见光透射率和红外反射率最高分别为 89% 和 95%, 可以实现可见-红外兼容的隐身。以上多层结构虽然实现了功能的集成, 但层与层之间的界面结合较为简单。WANG 等^[51]利用重力诱导填料 Al/Bi₂O₃ 分离后, 采取相关冷冻干燥工艺, 制备了非对称复合材料 (Al/Bi₂O₃/WPU, WPU 为水性聚氨酯)。此复合材料一侧是低发射率层, 另外一侧是 WPU 泡沫形成的隔热层, 双层间不需要另外的黏合剂也能稳定地结合在一起。构筑的一体化的复合材料两侧辐射温差可达 35.5 °C (图 6d)。

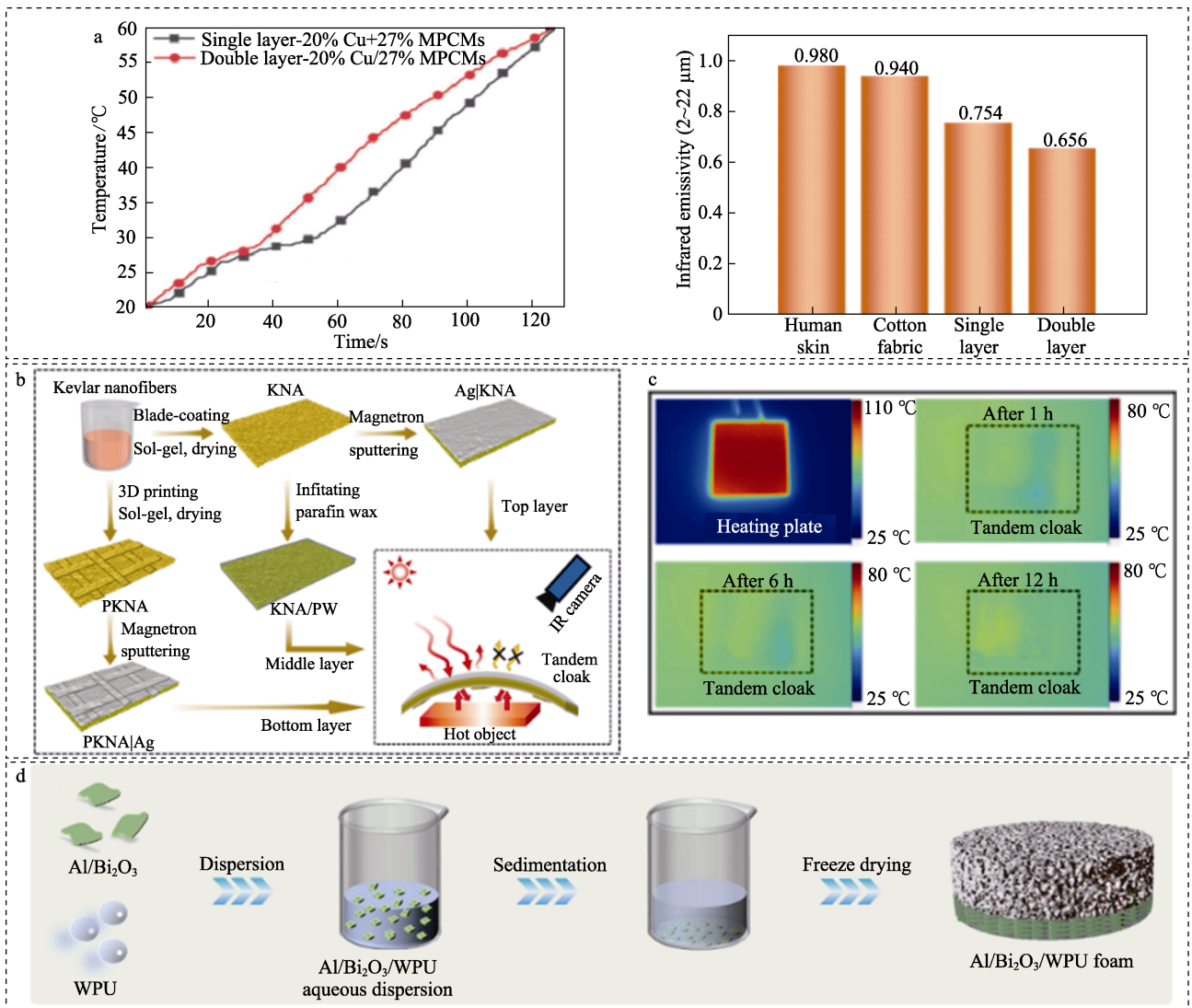


图 6 单层和双层涂层的温升曲线及红外发射率 (a)^[47]; 多层斗篷制备示意图及斗篷长时间工作热成像图 (b、c)^[48]; Al/Bi₂O₃/WPU 非对称复合材料的制备示意图 (d)^[51]
 Fig. 6 Temperature rise curves and infrared emissivity of single-layer and double-layer infrared camouflage fabrics (a)^[47]; Schematic illustration of fabrication strategies of tandem cloak and infrared images of tandem cloak after long term working (b, c)^[48]; Scheme of preparation process for asymmetric Al/Bi₂O₃/WPU composite material (d)^[51]

层状结构的研究比较早, 工艺及原理也相对简单, 普遍适用性较好, 尤其是对战机, 多层结构设计仍是主流。但层状结构不可避免会引入其他材料, 需要合理控制目标自重, 避免影响实用性。

3.2 核-壳结构

核-壳结构通常作为红外隐身涂层的填料, 其制备方法多样、便于设计, 以相变材料或空心微球为核层、低发射率材料为壳层, 制备的材料具有优异的控温性能及低的发射率^[52]。相变材料能够对热量进行释放和储存, 使目标表面温度及时地响应周围环境的变化, 从而实现长效红外隐身^[53-54]。相变材料根据相态变化可分为多种, 其中, 固液相变材料潜热最大、导热系数较低、应用最广泛。可将固液相变材料乳化或成微球或者制备成水凝胶, 直接涂覆在织物上, 实

现一定的红外隐身性能^[55-56], 这些方法虽然能起到一定的红外隐身效果, 但材料发射率较高, 且相变后液体容易泄漏。ZHOU 等^[57]通过化学镀法, 将铜包覆在含石蜡的脲醛表面, 制备了双壳层结构, 随着表面铜层逐渐完整, 石蜡微球红外发射率最低可降至 0.68。纯金属层易脱落且包覆不均匀, 会影响红外发射率。KE 等^[58]采用原位聚合法, 以掺杂纳米铁的碳酸钙为壳层、硬脂酸为内核, 制备了具有红外隐身性能的核-壳结构。结果表明, 纳米铁的加入可以使材料红外发射率降至 0.39, 比未掺铁的降低了 54.7%。除了使用相变材料作为核层外, 还可以使用中空微珠作为核层以实现控温效果。与相变材料相比, 中空微珠质量小、稳定性强、导热系数低。XU 等^[59]通过化学镀法, 制备了镀 Ag 的中空玻璃微球

(HGMs), 将其和 Al 粉共同作为填料, 制备的涂层在加热后显示出比填料只有中空玻璃微球或者 Al 粉的涂层更好的红外隐身性能。镀 Ag 降低了中空玻璃微球的发射率, 使其与铝粉具有协同效应(图 7)。

与金属填料相比, 核-壳结构的材料可控制表面

温度, 使涂层可以在高温及温度变化较大的环境下使用, 但其发射率仍相对较高。一方面是由于结构形貌为球状, 不利于形成连续反射层, 限制其发射率的下降; 另一方面, 通过化学镀法制备的壳层大多较为粗糙, 影响了对红外的反射。

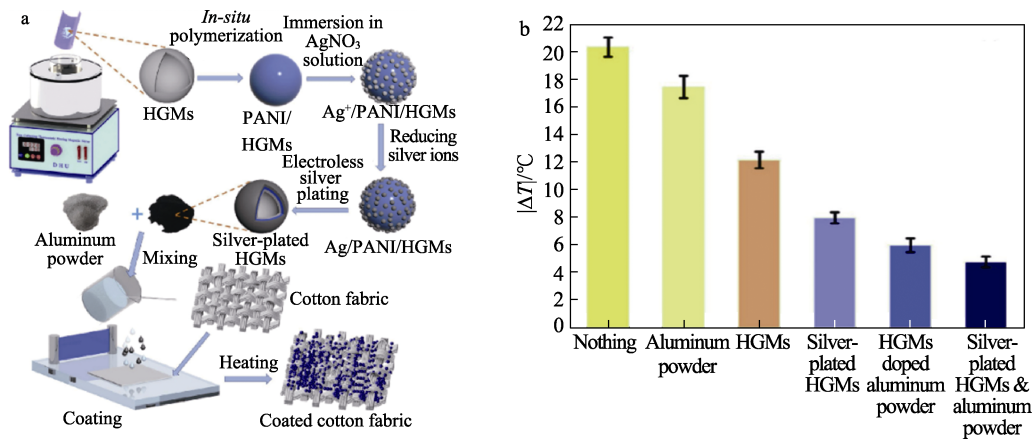


图 7 镀银 HGMs 的制备及涂布棉织物工艺示意图 (a); 不同涂层织物加热后和环境的温差 (b)^[59]

Fig. 7 Schematic diagram of preparation process of silver-plated HGMs and coated cotton fabric (a); Temperature difference between different coated fabrics and the environment after heating (b)^[59]

3.3 多孔结构

为实现良好的隔热能力, 可构建中空微球核-壳结构, 也可搭建多孔骨架。常见的多孔骨架有气凝胶^[60]、泡沫^[61]等, 将金属渗透到其中或表面, 可得到具有双重隐身效果的复合材料。CHENG 等^[62]先后通过静电自组装和浸涂吸附工艺, 在三聚氰胺泡沫上面组装了 Ni/MXene 杂化物。结果表明, 经过处理后的泡沫同时具有较低的红外发射率和良好的隔热性能, 杂化物显示出优异的红外隐身性能。多孔结构除了具有优异的隔热性能外, 还具有屏蔽电磁的作用。SHI 等^[63]通过简单的共沉淀和浸涂工艺, 将氧化铁纳米粒子和银纳米线组装到甲醛泡沫骨架上, 得到的复合泡沫材料具有良好的电磁屏蔽性能和隐身性能。尽管多孔结构材料取得了一定的进展, 但由于其厚度大、制作方法复杂, 大部分无法满足实际应用和实现工业化生产。

4 结束语与展望

为应对日益先进的侦测设备及复杂的工作环境, 近年来, 基于金属在红外波段的低发射率特性, 通过结构设计实现控温的红外隐身技术取得了很大的进展, 但仍存在以下问题亟待解决。

(1) 目前战场侦测手段多样, 单一波段的隐身技术已无法有效保证目标在战场中隐身, 用金属材料与其他非金属材料复合并进行结构设计, 开发更为先进的多波段隐身兼容材料, 并保证工程应用,

是研究的关键之一。

(2) 当前, 大部分红外隐身技术只考虑到固定的背景环境, 然而现实中, 常态环境不断变化, 因此, 未来应制备金属基智能红外隐身材料, 以实现电致变发射率或温致变发射率, 从而实时与环境变化相匹配。

(3) 实战环境中不可避免地存在材料磨损、腐蚀及老化等问题, 影响其隐身效果及使用寿命。目前, 改性方法由于易引起金属材料表面发生变化, 或引入了红外吸收基团导致红外发射率上升。因此, 在不影响红外隐身性能的前提下, 对金属材料进行耐磨、耐腐蚀、耐老化等实用化改性有待进一步完善。

参考文献:

- [1] CHEN Y C (陈易诚), TU J Y (涂建勇), LI X (李鑫), *et al.* Design principle and research progress of radar/Infrared compatible stealth materials[J]. *Materials Review (材料导报)*, 2025, 39(6): 48-57.
- [2] XU Y H (许毅辉), JIA L J (贾凌杰), JIA X B (贾贤补), *et al.* Research progress of infrared stealth protection materials[J]. *Packing Engineering (包装工程)*, 2023, 44(9): 137-146.
- [3] HU J H, HU Y, YE Y G, *et al.* Unique applications of carbon materials in infrared stealth: A review[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 452: 139147.
- [4] CHEN H. *Infrared physics*[M]. Beijing: National Defense Industry Press (国防工业出版社), 1985.
- [5] ZHOU Y, RATHER L J, YU K, *et al.* Research progress and recent advances in development and applications of infrared stealth materials: A comprehensive review[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(12): 2400530.
- [6] LIN C (林冲), REN R T (任润桃), ZHUANG H Y (庄海燕). Research progress of modification methods for low emissivity metallic pigments[J]. *Development and Application of Materials (材料开发与应用)*, 2018, 33(4): 122-126.

- [7] MU L (沐磊), WANG L X (王丽熙), HUANG Y (黄芸), *et al.* Research and development tendency of infrared stealthy coatings[J]. *Materials Reports (材料导报)*, 2007(1): 122-125.
- [8] XU R, WANG W, YU D. A novel multilayer sandwich fabric-based composite material for infrared stealth and super thermal insulation protection[J]. *Composite Structures*, 2019, 212: 58-65.
- [9] XU Y, WAN G Y, MA L L, *et al.* Indium tin oxide as a dual-band compatible stealth material with low infrared emissivity and strong microwave absorption[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2023, 11(5): 1754-1763.
- [10] WANG D H, ZHANG T, ZHANG X, *et al.* Temperature response intelligent infrared stealth fabric based on the combined action of low infrared emissivity and heat isolation[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 1008: 176735.
- [11] FENG Z T, LIU Y J, ZHAO X M. Polyaniline/hollow glass beads/carbon fiber powder composite film for multifunctional military tarpaulins[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2024, 194: 108601.
- [12] CHEN L Y, ZHANG H N, MAO Z P, *et al.* Integrated Janus cellulosic composite with multiple thermal functions for personalized thermal management[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 288(Suppl C): 119409.
- [13] MA D H, XIE Y S, WANG L, *et al.* Layered $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ flexible fibrous membrane for super thermal insulation and infrared stealth[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 468: 143488.
- [14] FANG K Y, FANG F. Au-decorated SWNT/PVDF electrospun films with enhanced infrared stealth performance[J]. *Materials Letters*, 2018, 230: 279-282.
- [15] ZHAO Y C, FANG F. An energy-saving composite textile for thermal management[J]. *Composites Science and Technology*, 2023, 237: 110013.
- [16] ZHANG T, FENG W Q, CHEN Y X, *et al.* Low emissivity and thermal insulating infrared stealth composite of silver plating TPU fibers@WPU/CNF aerogel with all-in-one structure[J]. *Cellulose*, 2023, 30(16): 10215-10230.
- [17] WANG H, MA Y Y, QIU J. Multifunctional PAN/Al-ZnO/Ag nanofibers for infrared stealth, self-cleaning, and antibacterial applications[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2021, 5(1): 782-790.
- [18] CHEN M X, JIANG X P, HUANG J. Flexible wearable $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ composite carbon fabric textile with infrared stealth and electromagnetic interference shielding effect[J]. *Advanced Optical Materials*, 2024, 12(4): 2301694.
- [19] YE X Y, CHEN Y, YANG J, *et al.* Sustainable wearable infrared shielding bamboo fiber fabrics loaded with antimony doped tin oxide/silver binary nanoparticles[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2023, 6(3): 106.
- [20] WANG J. Multifunctional textiles enabled by simultaneous interaction with infrared and microwave electromagnetic waves[J]. *Advanced Mater Interfaces*, 2022, 9(12): 2102322.
- [21] WIJEWARDANE S, GOSWAMI D. A review on surface control of thermal radiation by paints and coatings for new energy applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(4): 1863-1873.
- [22] CARRIERI A, COPPER J, OWENS D J, *et al.* Infrared differential-absorption Mueller matrix spectroscopy and neural network-based data fusion for biological aerosol standoff detection[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(3): 382-393.
- [23] WANG Y Q, HUANG Y X, YUAN L, *et al.* The design and calculation of the infrared properties for low emissivity coatings dependent on the structure and distribution of flake Al pigments[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2024, 138: 105206.
- [24] LIU L Y, GONG R Z, HUANG D X, *et al.* Calculation of emittance of a coating layer with the Kubelka-Munk theory and the Mie-scattering model[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, 22(11): 2424-2429.
- [25] JIAN S, XIE J L, LIU Y F, *et al.* Modified Kubelka's layer model for calculation of infrared properties of low emissivity coatings with optically-rough surface[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 83: 177-181.
- [26] YANG M, XU W B, LI J W, *et al.* A modified version of BRDF model based on Kubelka-Munk theory for coating materials[J]. *Optik*, 2019, 193: 162982.
- [27] LYU D D (吕丹丹), LUO J W (罗静文), ZHANG W G (张伟钢). Preparation and properties of epoxy resin/brass composite coatings with low infrared emissivity[J]. *New Chemical Materials (化工新型材料)*, 2024, 52(7): 132-137.
- [28] YAN X X, WANG L. Preparation and performance of a waterborne UV/Al low infrared emissivity coating[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(18): 6423.
- [29] SHI M Y, XU C, YANG Z H, *et al.* Achieving good infrared-radar compatible stealth property on metamaterial-based absorber by controlling the floating rate of Al type infrared coating[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 764: 314-322.
- [30] WU W, TONG L P, ZHOU H, *et al.* Combined experimental and DFT study on 2D MoSe_2 toward low infrared emissivity[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(28): 2201906.
- [31] WANG L, LIU C Y, XU G Y, *et al.* Influences of morphology and floating rate of CeO_2 fillers on controlling infrared emissivity of the epoxy-silicone resin based coatings[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2019, 229: 380-386.
- [32] SONG K L, XIE M, AI Q. Optical properties of polymer-based coatings containing metallic particles: Effect of particle shape and binder[J]. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2023, 20(5): 1611-1619.
- [33] SONG K L, XIE M, AI Q, *et al.* Effects of size, volume fraction, and orientation of metallic flake particles on infrared radiation characteristics of Al/acrylic resin composite coatings[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 145: 105680.
- [34] WANG Y Q, HUANG Y X, YUAN L, *et al.* The design and calculation of the infrared properties for low emissivity coatings dependent on the structure and distribution of flake Al pigments[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2024, 138: 105206.
- [35] LIU Z H, BAN G D, YE S T, *et al.* Infrared emissivity properties of infrared stealth coatings prepared by water-based technologies[J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(12): 3716-3724.
- [36] SHI M Y, XU C, YANG Z H, *et al.* Achieving good infrared-radar compatible stealth property on metamaterial-based absorber by controlling the floating rate of Al type infrared coating[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 764: 314-322.
- [37] MA Z S, LI Q, WEI J F, *et al.* Effects of Al-based alloy powders on the mechanical behavior, corrosion resistance and infrared emissivity of polyurethane composite coatings[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 624: 126782.
- [38] ZHANG J M, ZHANG W G, GUAN Q S, *et al.* Preparation and properties of epoxy resin and polyurethane blend resin-based low-infrared-emissivity coatings[J]. *Coatings*, 2022, 12(11): 1708.
- [39] LIANG J, LI W, XU G Y, *et al.* Preparation and characterization of the colored coating with low infrared emissivity based on nanometer pigment[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2018, 115: 74-78.
- [40] CHAI X, ZHU D M, CHEN Q, *et al.* Tailored composition of low emissivity top layer for lightweight visible light-infrared-radar multiband compatible stealth coating[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2022, 5(4): 3094-3103.
- [41] QIN H, ZHANG M J, GUAN Y, *et al.* Laser absorption and infrared stealth properties of Al/ATO composites[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(11): 14312-14315.
- [42] MENG Z (孟真), LI G D (李广德), CUI G Z (崔光振), *et al.* Research progress of infrared/radar compatible stealth materials based on metamaterials[J]. *Materials Reports (材料导报)*, 2023, 37(21): 5-12.
- [43] ZHANG M, LI M, YAN Z K. Multifunctional Ag-ZrB_2 composite film with low infrared emissivity, low visible light reflectance and hydrophobicity[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 604: 154626.
- [44] ZHU H Z, LI Q, ZHENG C Q, *et al.* High-temperature infrared camouflage with efficient thermal management[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 60.
- [45] TAEHWAN K, BAE J Y, NAMKYU L, *et al.* Hierarchical metamaterials for multispectral camouflage of infrared and microwaves[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(10): 1807319.